

# Time-resolved single-electron detection in semiconductor nanostructures

**Doctoral Thesis****Author(s):**

Gustavsson, Simon

**Publication date:**

2008

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005628096>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 17709

# **Time-resolved single-electron detection in semiconductor nanostructures**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Science

presented by

**Simon Gustavsson**

M.Sc. Engineering physics,  
Chalmers University of Technology  
born July 24, 1978  
citizen of Sweden

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Gianni Blatter, co-examiner  
Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner

March 2008

# Abstract

In the work presented in this thesis we use time-resolved charge detection techniques to investigate single-electron tunneling in semiconductor quantum dots. The ability to detect individual charges in real-time makes it possible to count electrons one-by-one as they pass through the structure. The setup can thus be used as a high-precision current meter for measuring ultra-low currents, with resolution several orders of magnitude better than that of conventional current meters. A single-electron detector setup is therefore envisioned to be used as a natural definition for a current standard.

In addition to measuring the average current, the counting procedure also makes it possible to investigate correlations between charge carriers. Electron correlations are conventionally probed in noise measurements, which are technically challenging due to the difficulty to exclude the influence of external noise sources in the experimental setup. Using real-time charge detection techniques, we circumvent the problem by studying the electron correlation directly from the counting statistics of the tunneling electrons. In quantum dots, we find that the strong Coulomb interaction makes electrons try to avoid each other. This leads to electron anti-bunching, giving stronger correlations and reduced noise compared to a current carried by statistically independent electrons.

In our setup, the charge detector is implemented by monitoring changes in conductance in a near-by capacitively coupled quantum point contact. In a series of measurements on a double quantum dot structure, we find that the quantum point contact not only serves as a detector but also causes a back-action onto the measured device. Electron scattering in the quantum point contact leads to emission of microwave radiation. The radiation is found to induce an electronic transition between two quantum dots, similar to the absorption of light in real atoms and molecules. Using a charge detector to probe the electron transitions, we can relate a single-electron tunneling event to the absorption of a single photon. Moreover, since the energy levels of the double quantum dot can be tuned by external gate voltages, we use the device as a frequency-selective single-photon detector operating at microwave energies. The ability to put an on-chip microwave detector close to a quantum conductor opens up the possibility to investigate radiation emitted from mesoscopic structures and give a deeper understanding of the role of electron-photon interactions in quantum conductors.

A central concept of quantum mechanics is the wave-particle duality; matter exhibits both wave- and particle-like properties and can not be described by either formalism alone. In the previously mentioned experiments, the electrons were treated as particles tunneling back and forth between the quantum dots. To investigate the wave properties of the electrons, we perform experiments on a structure containing a double quantum dot embedded in the Aharonov-Bohm ring interferometer. Aharonov-Bohm rings are traditionally used to study interference of electron waves traversing different arms of the ring, in a similar way to the double-slit setup used for investigating interference of light waves. In our case, we use the time-resolved charge detection techniques to detect electrons one-by-one as they pass through the interferometer. We find that the individual particles indeed self-interfere and give rise to a strong interference pattern as a function of external magnetic field. The high level of control in the system together with the ability to detect single electrons enables us to make direct observations of non-intuitive fundamental quantum phenomena like single-particle interference or time-energy uncertainty relations.

# Zusammenfassung

In dieser Doktorarbeit wird das Tunneln von einzelnen Elektronen in Quantendots mit Hilfe eines hochempfindlichen Ladungsdetektors zeitaufgelöst untersucht. Die Fähigkeit, einzelne Elektronen in Echtzeit zu messen, ermöglicht das Zählen von Elektronen während sie durch die Struktur fließen. Damit kann die experimentelle Anordnung als ein Strommesser betrachtet werden, bei dem die Empfindlichkeit mehrere Größenordnungen höher ist, als bei einem herkömmlichen Amperemeter. Der Einzel-elektrondetektor wird deshalb als primäres Messgerät zur Definition des Stromstandards diskutiert.

Das Elektronenzählen ermöglicht, zusätzlich zur Messung des mittleren Stroms, auch Korrelationen zwischen den Ladungsträgern zu untersuchen. Elektronenkorrelationen werden üblicherweise mittels Rauschmessungen erforscht. Solche Messungen sind aber technisch anspruchsvoll, da es sich als schwierig erweist, den Einfluss äusserer Rauschquellen zu vermeiden. Mit der Echtzeiterkennung der Elektronen wird das Problem behoben, weil die Korrelationen direkt aus der Zählstatistik der Elektronen abgeleitet werden können. Für den Elektronentransport durch Quantendots finden wir, dass die starke Coulomb-Wechselwirkung zu einer gegenseitigen Abstoßung der Elektronen führt. Das ergibt wechselwirkungsbedingte Korrelationen zwischen den Ladungsträgern und einen Strom, der weniger Rauschen aufweist, als ein Strom, der von statistisch unabhängigen Elektronen getragen wird.

In unserer experimentellen Anordnung besteht der Ladungsdetektor aus einem Quantenpunktkontakt, der in direkter Nähe des Quantendots platziert ist. Durch kapazitive Kopplung führt eine Änderung der Ladung des Quantendots zu einer messbaren Änderung der Leitfähigkeit des Quantenpunktkontaktes. In eine Reihe von Messungen an einem Doppelquantendot stellt sich aber heraus, dass der Punktkontakt nicht nur als Detektor funktioniert, sondern auch einen Einfluss auf die gemessene Struktur ausübt. Elektronenstreuung im Quantenpunktkontakt führt zur Emission von Strahlung im Mikrowellenbereich. Wir finden dass die Strahlung elektronische Übergänge zwischen den zwei Quantendots hervorruft, ähnlich der Absorption von Licht in realen Atomen und Molekülen. Mit dem Ladungsdetektor können wir einzelne Elektronenübergänge messen, und damit die Detektion von einem Elektron mit der Absorption eines einzelnen Photons identifizieren. Da das Energiespektrum des Doppelquantendots mit Gatespannungen sehr genau abgestimmt werden kann, können wir die Anordnung als frequenzselektiven Einzelphotonendetektor

für Mikrowellenstrahlung auffassen. Die Fähigkeit, einen Mikrowellen-detektor auf dem Chip in direkter Nähe eines mesoskopischen Systems zu platzieren, ermöglicht die Untersuchung ausgesendeter Strahlung mesoskopischer Strukturen und kann damit hoffentlich zu einem tieferen Verständnis der Rolle der Elektron-Photon-Wechselwirkungen für den Elektronentransport durch Nanostrukturen beitragen.

Ein zentrales Konzept der Quantenmechanik ist der Welle-Teilchen-Dualismus; Materie zeigt sowohl Wellen- als Teilcheneigenschaften. In den oben erwähnten Experimenten wurden die Elektronen als Teilchen behandelt, die zwischen Quantendots hin- und hertunneln. Um die Wellennatur der Elektronen zu untersuchen, haben wir Experimente an einem Doppelquantendot durchgeführt, der in ein Aharonov-Bohm Interferometer eingebettet ist. Aharonov-Bohm-Ringe werden häufig zum Studium der Interferenz von Elektronenwellen in Nanostrukturen verwendet; sie funktionieren ähnlich, wie das Doppelspaltexperiment für die Untersuchung der Interferenz von Lichtwellen. In unserem Experiment schicken wir einzelne Elektronen so durch das Interferometer, dass sie nach dem Durchgang mit dem Ladungsdetektor in Echtzeit detektiert werden können. Wir finden dass die einzelnen Teilchen tatsächlich mit sich selbst interferieren, was zu einem starken Interferenzmuster als Funktion des äusseren Magnetfeldes führt. Die hohe Kontrolle über unser System zusammen mit der Möglichkeit, einzelne Elektronen zu messen ermöglicht die direkte Beobachtung von nicht-intuitiven fundamentalen Quantenphänomenen wie der Interferenz von einzelnen Teilchen oder der Unschärfebeziehung bezüglich Zeit und Energie.